

## تعیین مدل اکتشافی بوکسیت جاجرم با استفاده از داده‌های اکتشافی در محیط GIS

کیانوش سلیمانی<sup>۱</sup>، علیرضا عرب امیری<sup>۲\*</sup>، ابوالقاسم کامکار روحانی<sup>۳</sup>، محمود شمس‌الدینی نژاد<sup>۴</sup>

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک-ژئوالکتریک، دانشگاه صنعتی شاهرود kianoosh.soleymani@gmail.com  
۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود alirezaarabamiri@yahoo.com  
۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود kamkarr@yahoo.com  
۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان mahmoud.shamsaddini@gmail.com

(دریافت ۲۶ بهمن ۱۳۹۲، پذیرش ۲۳ شهریور ۱۳۹۴)

### چکیده

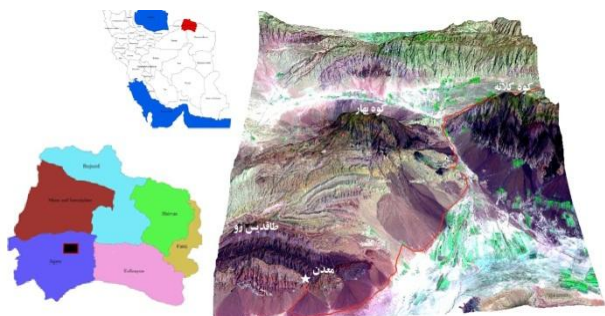
تلفیق اطلاعات اکتشافی متنوع (زمین‌شناسی، سنجش از دور، ژئوفیزیک، ژئوشیمی، حفاری و غیره) مسأله مهمی در شناسایی دقیق‌تر ذخایر معدنی است. هدف از این تحقیق، پردازش و تفسیر داده‌های زمین‌شناسی، سنجش از دور و ژئوفیزیک در منطقه معدنی بوکسیت جاجرم، تلفیق نتایج این داده‌های اکتشافی در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تهیه نقشه پتانسیل معدنی منطقه است. پردازش و تفسیر داده‌های ماهواره‌ای و ژئوفیزیکی در محدوده مورد مطالعه به صورت جداگانه انجام شد؛ که از هر یک، نتایج جداگانه‌ای حاصل شد و هر کدام مناطق خاصی را به عنوان مناطق بی‌هنجار (آنومالی) پیشنهاد کردند. در مطالعات سنجش از دور انجام شده، روش نسبت‌گیری بانندی برای شناسایی دولومیت‌ها و سنگ‌های سیلیسی در منطقه استفاده شد. داده‌های ژئوفیزیکی منطقه نیز شامل ۸۲ سونداژ ژئوالکتریک در طول ۳ خط برداشت با فاصله ۲۵ متر از هم و فاصله بین خطوط برداشت ۱۰ متر بود. بعد از انجام مدل‌سازی یک‌بعدی سونداژها، یک مدل سه بعدی با کمک مدل‌های مذکور و با استفاده از نرم‌افزار Rock work تهیه شد. در نهایت لایه‌های اطلاعاتی حاصل از داده‌های اکتشافی مختلف با استفاده از روش منطق فازی و عملگر گاما، در GIS با یکدیگر تلفیق شده و نقشه پتانسیل کانی‌سازی بوکسیت در منطقه تهیه شد. نقشه‌های پتانسیل کانی‌سازی مربوطه، مناطقی را که ارزش فازی بالاتری دارد، به عنوان مناطق مستعد برای حضور کانی‌سازی بوکسیت پیشنهاد کرده است.

### واژه‌های کلیدی

بوکسیت، سنجش از دور، ژئوفیزیک، مدل‌سازی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، منطق فازی

## ۱- مقدمه

۳۷° تا ۶' ۳۷° شمالی و طول‌های ۲۵' ۵۶° تا ۴۳' ۵۶° شرقی قرار گرفته و بخشی از نقشه زمین‌شناسی ورقه‌های ۱:۱۰۰,۰۰۰ سنخو است و رباط قره‌بیل را تشکیل می‌دهد. مورفولوژی منطقه مورد مطالعه مانند دیگر معادن بوکسیت جاجرم کوهستانی و به نسبت مرتفع بوده و به صورت رشته کوهی در شمال کویر جاجرم دیده می‌شود. ویژگی‌های سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی سازنده‌های گسترده در منطقه و تکتونیک حاکم بر ناحیه، نقش اساسی را در تشکیل ژئومورفولوژی منطقه بر عهده داشته و تاقدیس زو با ارتفاع بیش از ۱۸۳۲ متر از سطح دریا مظهر روشن این تغییرات مورفولوژی است (شکل ۱) [۶].



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و مورفولوژی منطقه مورد بررسی

## ۲-۲- زمین‌شناسی منطقه

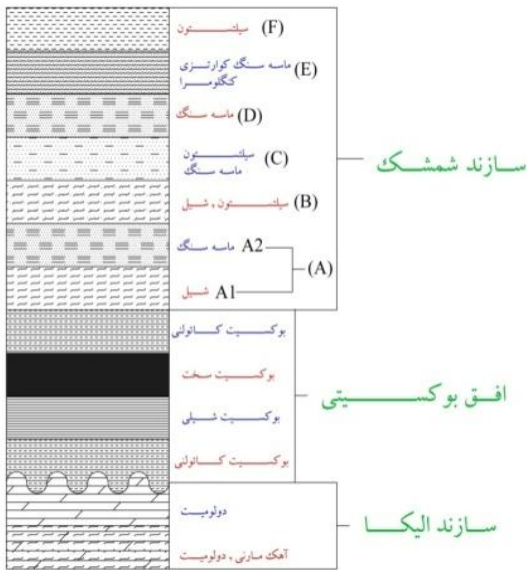
ناحیه مورد مطالعه در مرز بین حوضه‌های رسوبی-تکتونیکی البرز شرقی، کپه داغ و شرق ایران قرار دارد. در دوران‌های پالئوزوئیک و مزوزوئیک مجموعه قابل توجهی از نهشته‌های رسوبی در این منطقه بر جای مانده است. رخنمون‌های این واحدها در محدوده کوه زو برون‌زد داشته و نهشته‌های کم‌عمق دریائی، رسوبات تخریبی-تبخیری و حتی نفوذی‌های آذرین در آن نمود پیدا کرده‌اند. تنش‌های وارده بر نهشته‌های فوق در طی چند مرحله موجب بروز ساختارهای تکتونیکی مختلفی شده که از بارزترین این ساختارها، تاقدیسی بزرگ با امتداد شرقی-غربی است؛ که بوسیله گسل‌های مختلف تراستی، نرمال و امتداد لغز به قطعات متعددی تبدیل شده است [۶]. سازندها و واحدهای مهم منطقه به ترتیب عبارتند از: سازند الیکا، واحد بوکسیتی، سازند شمشک. سازند الیکا شامل دو بخش است که بخش زیرین آن از ۹۵ متر آهک، آهک دولومیتی متورق و شیل به رنگ زرد تا صورتی تشکیل شده و بخش بالایی آن با ضخامت ۲۰۰ متر شامل دولومیت و دولومیت آهکی با لایه-

هدف نهایی در اغلب پروژه‌های GIS ترکیب و تلفیق داده‌های مکانی از منابع گوناگون با هم است؛ تا بتوان اثرات متقابل آن‌ها را توصیف، تجزیه و تحلیل کرده و با کمک مدل‌ها پیش‌بینی-هایی برای تصمیم‌گیرندگان به‌عنوان یک تکیه‌گاه فراهم شود. یکی از توانایی‌های مهم و اصلی در GIS ترکیب لایه‌های مختلف مرتبط با علوم زمین به‌منظور تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی است که در آن مناطق مطلوب برای اکتشاف کانسارها مشخص شده است [۱]. روش‌های استخراج الگوهای پیش‌گو بسیار گسترده و متنوع می‌باشند. این روش‌ها به دو گروه اصلی داده‌محور و دانش‌محور تقسیم می‌شوند. تخصیص وزن در این روش‌ها بر اساس همراهی مکانی کانسارهای هم‌نوع با ذخایر مورد پی‌جویی، بر اساس معیارهای اکتشافی انجام می‌شود [۲، ۱]. در روش‌های داده‌محور به یک سری اطلاعات قبلی در مورد کانسارها و نشانه‌های معدنی شناخته شده در منطقه مورد مطالعه نیاز است. ارتباط فضایی بین داده‌های ورودی (نقشه‌های شاهد) و موقعیت مکانی محدوده‌های معدنی، در برآورد اهمیت و وزن هر کدام از نقشه‌های شاهد استفاده می‌شود. روش‌هایی مثل رگرسیون منطقی، وزن‌های نشانگر (WofE) و شبکه‌های عصبی مثال‌هایی از روش‌های داده‌محور می‌باشند. اما روش‌های دانش‌محور یا تجربه‌محور بر اساس داده‌های زمین‌شناسی ورودی و اهمیت هر لایه (نقشه‌های شاهد) وزن‌دار می‌شوند و در ارتباط با مدل‌های اکتشافی خاصی استفاده می‌شوند. تخمین وزن هر نقشه شاهد و تخمین امتیاز و ارزش هر الگو از هر نقشه شاهد، بر اساس قضاوت کارشناسی و تخصصی روی همراهی فضایی بین کانسارهای مورد جستجو و اطلاعات زمین‌شناسی شاخص به‌عنوان راهنما و نشانه صورت می‌گیرد. روش‌هایی مثل تحلیل سلسله مراتبی، همپوشانی شاخص و منطق فازی، مثال‌هایی از روش‌های دانش‌محور می‌باشند. منطق فازی در بررسی‌های گسترده‌ای از جمله اکتشاف مس پرفیری [۳]، اکتشاف سرب و روی [۴] و اکتشاف طلا [۵] در تهیه نقشه پتانسیل معدنی استفاده شده است. در این پژوهش نیز از روش منطق فازی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی بوکسیت استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش کار

## ۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

کانسار بوکسیت جاجرم در ۱۹ کیلومتری شمال‌شرق شهر جاجرم و در کوه زو قرار دارد (شهرستان جاجرم در جنوب غربی استان خراسان‌شمالی واقع شده است). وسعت منطقه مورد مطالعه ۳۰۰ کیلومتر مربع است که بین عرض‌های ۰'



شکل ۲: ستون چینه‌شناسی سازندهای بالا و پایین افق بوکسیتی در جاجرم

با توجه به ابعاد اندک رخنمون‌های بوکسیتی منطقه و همچنین به علت عدم وجود آلتراسیون مشخص برای بوکسیت، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ETM+ و استر، به طور مستقیم نمی‌توان بوکسیت را در منطقه شناسایی کرد. در نتیجه برای شناسایی آن می‌توان از کانی‌ها و سنگ‌های همراه بوکسیت استفاده کرد. در این پژوهش به منظور شناسایی بوکسیت از واحدهای سنگی همراه آن مثل دولومیت‌های سازند الیکا و رسوبات آواری سیلیسی‌دار سازند شمشک، استفاده شد. در این پژوهش از نسبت‌های بانندی پیشنهادی برای بارزسازی واحدهای مورد نظر استفاده شد (جدول ۱) [۹-۱۲].

جدول ۱: نسبت‌های بانندی مناسب برای واحدهای سنگی مورد مطالعه روی تصاویر استر

عارضه	نسبت بانندی
کربناتها / کانی‌های مافیک	
دولومیت	$7 / (8+6)$
سیلیکاها	
سنگهای غنی از کوارتز	$14/12$
SiO <sub>2</sub>	$13/12$
ترکبات سیلیسی	$11/12$

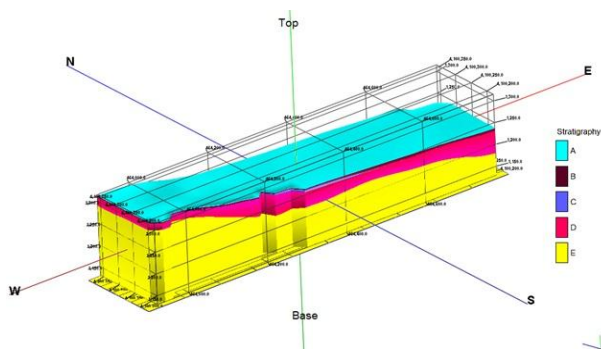
بندی خوب تا ضخیم

لایه به رنگ خاکستری مایل به زرد تشکیل شده است. این دو بخش ممکن است متعلق به تریاس زیرین و میانی باشند. در منطقه جاجرم علاوه بر واحد بوکسیتی مربوط به تریاس فوقانی، یک واحد بوکسیتی دیگر نیز وجود دارد که مربوط به قبل از تریاس زیرین است. این دو واحد را به ترتیب به نام واحدهای A و B نامگذاری کرده‌اند. واحد بوکسیتی B ضخامت و عیار قابل-توجهی در مقایسه با واحد بوکسیتی زیر سازند الیکا (واحد بوکسیتی A) داشته و سطح فرسایش یافته و کارستی شده الیکا را پوشانده است. واحد بوکسیتی تریاس بالایی (واحد B) شامل دو بخش نرم یا شیلی (که در واقع لاتریت بوده و به عنوان بوکسیت شیلی نامگذاری شده است) و سخت است که عیار  $Al_2O_3$  قسمت سخت بوکسیت بسیار بیشتر از قسمت نرم آن است. این دو بخش به وسیله دو واحد کائولن یا بوکسیت کائولنی پایین و بالایی محصور شده‌اند. ضخامت واحد بوکسیتی در طول ۱۲ کیلومتر گسترش خود یکنواخت نبوده و از حداقل کمتر از ۱ متر تا حداکثر بیش از ۴۰ متر متغیر است.

رسوبات آواری سازند شمشک با سنی معادل تریاس بالایی ژوراسیک به طور هم‌شیب و عادی روی واحد بوکسیتی B قرار گرفته است. به طور کلی این سازند از ماسه‌سنگ، شیل و سیلتستون همراه با لایه‌های نازک و عدسی‌های زغال‌دار تشکیل شده است که فسیل‌های گیاهی متعددی در این رسوبات یافت می‌شوند. لایه آهک با ضخامت کم که انباشته از قطعات دو کفه‌ای و اکتینوئید است به عنوان لایه راهنما در منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. شکل ۲ ستون چینه-شناسی منطقه مورد نظر را نشان می‌دهد.

## ۲-۳- مطالعات دورسنجی

داده‌های دورسنجی مورد استفاده در این تحقیق شامل تصاویر ETM+ و ASTER است که تصویر ETM+ مورد استفاده با گذر ۱۶۱ و ردیف ۳۴ در سال ۲۰۰۰ گرفته شد. و تصویر ASTER منطقه با شماره Aster1b\_020401\_371 که در سال ۲۰۰۱ به دست آمده است. قبل از انجام پردازش‌ها، تصحیحات هندسی و رادیومتریک روی تصاویر اعمال شد. این تصحیحات برای رفع نقایص و خطاهای تصاویر خام دریافت شده از سنجنده‌ها با هدف تصحیح یا جبران خطاهای سیستماتیک انجام می‌شود.



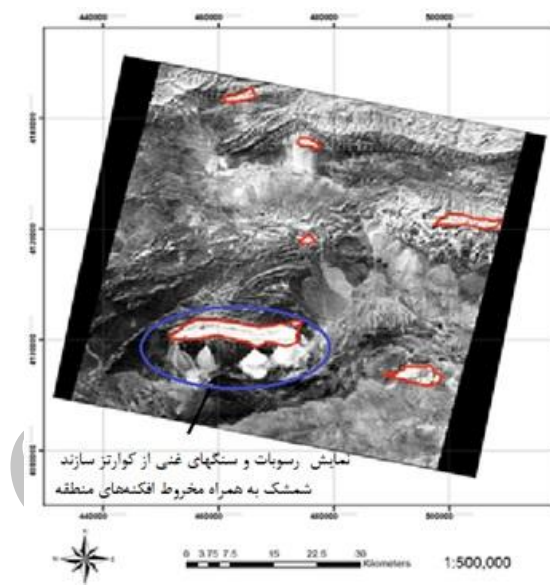
شکل ۴: مدل سه‌بعدی ژئوالکتریکی حاصل از تفسیر یک‌بعدی سونداژهای منطقه برداشت

با توجه به بررسی‌هایی که بر روی پارامترهای مؤثر در شناخت مناطق پتانسیل معدنی در محدوده مورد مطالعه صورت گرفت، ضرورت انتخاب چهار لایه اطلاعاتی شامل واحد بوکسیتی، واحد دولومیتی، واحد سنگ‌های سیلیسی و نقشه شیب منطقه برای تلفیق داده‌ها اجتناب‌ناپذیر بود. برای تولید واحدهای سنگی مورد نظر، از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره-ای منطقه استفاده شد. بدین صورت که پس از تفسیر و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و شناسایی لایه‌های مورد نظر و همین‌طور رقومی‌سازی نقشه زمین‌شناسی منطقه و پرسش‌گیری، از آن برای جدا کردن واحدهای سنگی مورد نظر استفاده شد و سپس این دو لایه با هم تلفیق شده و لایه واحدهای سنگی منطقه تشکیل شد. چون کانسارهای بوکسیت در شیب‌های کم که شرایط مناسب برای زهکشی را دارد قرار دارند، پارامتر شیب استفاده شد. برای تهیه نقشه شیب از اطلاعات رستری با اندازه سلول ۳۰ متر استفاده شد.

#### ۲-۵- منطق فازی

مدل‌سازی به روش منطق فازی بر اساس تئوری مجموعه‌های فازی بنا شده است [۸]. مثال‌هایی از کاربرد منطق فازی در نقشه‌برداری و مدل‌سازی پتانسیل معدنی توسط رنجبر و هنرمند برای شناسایی مس پرفیری [۳]، کارانزا و هال برای شناسایی طلا [۱۴] و نیکانن و همکاران برای شناسایی اکسیدهای آهن-طلا و مس [۱۵] ارائه شده است. به‌طور کلی کاربرد منطق فازی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی شامل سه مرحله اصلی است. مرحله اول شامل فازی‌سازی داده‌های مربوط به شواهد، مرحله دوم ترکیب منطقی نقشه‌های شاهد فازی با کمک شبکه‌ای از مجموعه عملگرهای مناسب فازی و مرحله سوم قطعی‌سازی و خروج از حالت فازی به‌منظور کمک

به‌دلیل آن که در روش‌های پردازشی که برای شناسایی واحدهای سنگی غنی از کوارتز با تصاویر ماهواره استر پیشنهاد شده، مخروط افکنه‌های آبرفتی منطقه نیز جدا می‌شود؛ بنابراین برای تفکیک این واحدها از تصاویر ETM+ استفاده شد. با مطالعه نمودار طیفی سنگ‌های غنی از کوارتز، مشخص شد که این سنگ‌ها در باند ۱ تصاویر لندست بازتاب و در باند ۷ جذب دارند. در نتیجه از نسبت باندی ۱/۷ ماهواره لندست برای شناسایی سنگ‌های غنی از کوارتز استفاده شد.



شکل ۳: نسبت باندی ۱۴ به ۱۲ روی تصویر استر منطقه برداشت (مناطق روشن نشانگر سنگ‌های غنی از کوارتز)

#### ۲-۴- آماده‌سازی نقشه‌های اکتشافی

برای تهیه مدل سه‌بعدی لایه‌های ژئوالکتریکی محدوده مورد مطالعه در نرم‌افزار RockWorks، به مقادیر مقاومت ویژه واقعی و ضخامت لایه‌های اعماق مختلف نیاز است که این اطلاعات استخراج شد سپس با استفاده از نرم‌افزار Spatial Analysis در محیط ArcMap مقاطع عمقی مربوطه تهیه شد. با یک نگاه کلی به مدل تهیه شده در شکل ۴، به‌سهولت می‌توان مقادیر مقاومت ویژه (لایه‌های ژئوالکتریکی) در اعماق مختلف (لایه-های D، E و B) را تفکیک کرد. در این حالت لایه D بر واحد بوکسیتی انطباق بیشتری دارد.

های مقاومت ویژه تعیین پارامترهای هندسی آنومالی‌های مشخص شده برای هر گونه تصمیم‌گیری است که می‌تواند در صرف هزینه‌های کلان مؤثر باشد. در نتیجه تفسیر کلی سونداژهای ژئوالکتریکی در منطقه مورد مطالعه چهار لایه ژئوالکتریکی قابل تشخیص است. این لایه‌ها به ترتیب از عمق به سطح عبارتند از:

۱) لایه دولومیتی که نقش سنگ بستر را دارد و تا حداکثر عمق نفوذ جریان مستقیم الکتریکی، گسترش قائم دارد. این لایه نسبت به لایه‌های ژئوالکتریکی دیگر مقاومت ویژه بیشتری دارد و گستره این پارامتر برای آن از ۲۰۰ تا ۵۰۰ اهم‌متر و بیشتر، است (لایه E در شکل ۷).

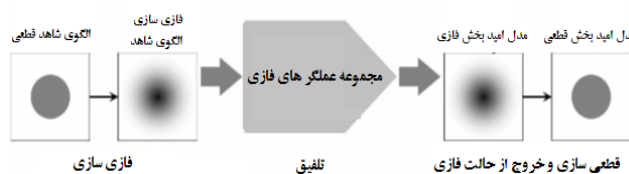
۲) لایه بعد حاوی انواع واحدهای بوکسیتی، شیل‌های ذغالی، ماسه‌سنگ دانه‌ریز و متخلخل و سیلتستون و غیره است که به دلیل عدم تباین مقاومت ویژه و همپوشانی گستره مقاومت ویژه آن‌ها از هم قابل تفکیک نیستند. مقاومت ویژه این لایه در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ اهم‌متر و در موارد انگشت شماری بیش از این مقدار است (لایه D در شکل ۷).

۳) یک روپاره رسانا با مقاومت ویژه کمتر از لایه دوم که مقاومت ویژه آن در حدود ۳۰ تا زیر ۱۰۰ اهم‌متر می‌باشد. جنس این لایه، عموماً آبرفت‌های سطحی است. با توجه به میزان بالای نزولات جوئی و زمان برداشت داده (آبان و دی‌ماه) این لایه، مرطوب بوده و کم بودن مقاومت ویژه آن متأثر از این موضوع است (لایه B در شکل ۷).

۴) یک لایه نازک سطحی که گستره مقاومت ویژه بالایی دارد و مقاومت ویژه‌های بسیار بالا (بیش از ۱۰۰۰ اهم‌متر) تا کم (حدود ۴۰ اهم‌متر) در آن دیده می‌شود. مقادیر کم احتمالاً مربوط به رس و آبرفت‌های دانه‌ریز و مرطوب سطحی و مقادیر بالا در روی سکوی حفاری گمانه‌ها و واریزه‌های ناشی از حفاری ثبت شدند (لایه C و A در شکل ۷)

(۵)

به تفسیر بهتر است [۱۶]. در شکل ۵ این مراحل به صورت نمادین نشان داده شده است.

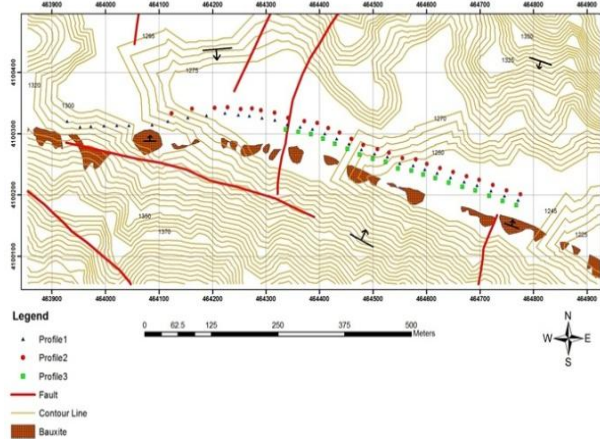


شکل ۵: مراحل نمادین کاربرد منطق فازی [۱۶]

فازی‌سازی، فرایند تبدیل شواهد فضایی به مجموعه‌های فازی است. یک مجموعه فازی به صورت گروهی از عضوهاست که میزان عضویت و تعلق آن‌ها به مجموعه با توجه به تخصیص عددی بین صفر و یک تعیین می‌شود. هر عضو مجموعه فازی به وسیله درجه و رتبه و عضویت خود در مجموعه تعریف می‌شود.

## ۲-۲- برداشت‌های اکتشافی

پس از انجام مطالعات اولیه و بازدید مقدماتی از ناحیه معدنی بوکسیت جاجرم، به منظور یافتن عمق، ضخامت و تغییرات قائم مقاومت ویژه لایه معدنی، از روش ژئوفیزیکی مقاومت ویژه با آرایش شلومبرژه استفاده شد. تعداد ۸۲ سونداژ به فاصله ۲۵ متر از هم بر روی سه خط برداشت موازی به فاصله ۱۰ متر در طول دره تاگویی روی واحدهای رسوبات آبرفتی، شیل‌های خاکستری و لایه‌های ماسه سنگی برداشت شد (شکل ۶).



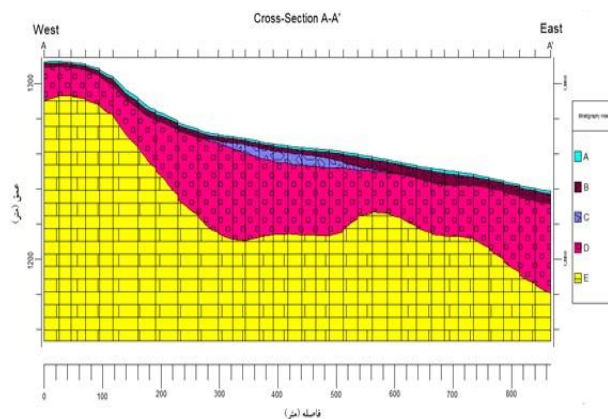
شکل ۶: موقعیت سونداژهای الکتریکی در منطقه مورد مطالعه به همراه نمایش توپوگرافی، رخنمون‌های بوکسیتی و گسل‌های منطقه

مدل‌سازی معکوس یک بعدی داده‌های مقاومت ویژه با استفاده از نرم‌افزار IX1D انجام شد. هدف از مدل‌سازی داده-

کارشناسی و تجارب قبلی استوار است روش دانش کارشناسی خوانده می‌شود [۱].

لایه‌هایی برای تلفیق مورد استفاده قرار می‌گیرند که بر اساس شناخت از منطقه و ویژگی‌های مناطق رخداد کانی‌سازی نیاز به بارسازی آن‌ها باشد. در انتخاب این لایه‌ها باید دقت کرد که از ورود اطلاعات و پارامترهای تکراری اجتناب شود. در منطقه مورد مطالعه برای واحد دولومیتی چهار بافر یک کیلومتری، برای لایه اکتشافی واحد بوکسیتی هشت بافر ۲۵۰ متری و برای لایه اکتشافی واحد ماسه‌سنگی سازند شمشک هفت بافر ۷۰۰ متری در نظر گرفته شد. برای تهیه نقشه شیب نیز از فایل رستر با اندازه سلول ۳۰ متر که از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شده بود؛ استفاده شد و پس از تهیه نقشه شیب از آن، در هفت دسته طبقه‌بندی شد. سپس بر اساس اهمیت هر کدام از لایه‌ها به هر کلاس امتیازی داده شد. به این صورت که در قسمت اصلی بوکسیت (خود لایه) امتیاز ۱ و در بافرها به ترتیب دور شدن، امتیازهای ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ تا ۰/۱ داده شد. برای لایه ماسه‌سنگی سازند شمشک نیز امتیازی بین ۰/۱ تا ۰/۸ پیش‌بینی شد.

اما برای دو لایه دیگر تعیین امتیاز قدری متفاوت بود. به این صورت که برای لایه دولومیتی روی خود واحد دولومیتی به دلیل این‌که بوکسیت روی خود لایه وجود ندارد امتیاز ۰/۱ و در بقیه موارد امتیازها به ترتیب دور شدن از بافر، امتیازهای ۰/۵ تا ۰/۲ انتخاب شد. امتیازدهی برای لایه شیب بدین صورت انجام گرفت که از نقشه ۱:۱۰۰۰ توپوگرافی منطقه که توسط گروه نقشه‌برداری معدن تهیه شده بود، استفاده شد. بدین صورت که پس از انطباق لایه بوکسیتی و نقشه شیب تهیه شده از نقشه توپوگرافی ۱:۱۰۰۰ منطقه، شیب‌های خاصی را که بوکسیت روی آن‌ها قرار دارد و مناسب برای زهکشی است تشخیص داده و بر این اساس نقشه شیب ۱:۱۰۰۰۰ منطقه طبقه‌بندی مجدد شد و در ۷ کلاس وزندهی شد که در جدول ۲ این امتیازها ارائه شده است.



شکل ۷: نمایش نتایج پروفیل اول ژئوفیزیک

### ۳- بحث و نتایج

در این پژوهش تلفیق داده‌های اکتشافی در دو مقیاس کوچک (۱:۱۰۰۰۰۰) برای پتانسیل‌یابی و بزرگ (۱:۵۰۰۰) برای تعیین نقاط بهینه حفاری اکتشافی انجام شد.

#### ۳-۱- تلفیق داده‌های اکتشافی در مقیاس کوچک

برای تلفیق اطلاعات اکتشافی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش منطق فازی، از عملگر گاما استفاده شد عملگر فازی گاما برحسب حاصل ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$\mu_{com} = (1-\gamma)^{\mu} * (\text{حاصل جمع جبری فازی}) \quad (1)$$

که در آن  $\gamma$  پارامتر انتخاب شده در محدوده صفر و یک است. وقتی  $\gamma$  یک باشد ترکیب همان جمع جبری فازی خواهد بود و وقتی صفر باشد ترکیب برابر با حاصل ضرب جبری فازی است. انتخاب صحیح و آگاهانه  $\gamma$ ، مقدارهایی در خروجی به وجود می‌آورد که هر یک سازگاری قابل انعطافی میان گرایش‌های افزایشی جمع جبری فازی و اثرات کاهش حاصل ضرب جبری فازی برقرار می‌کند [۱۷].

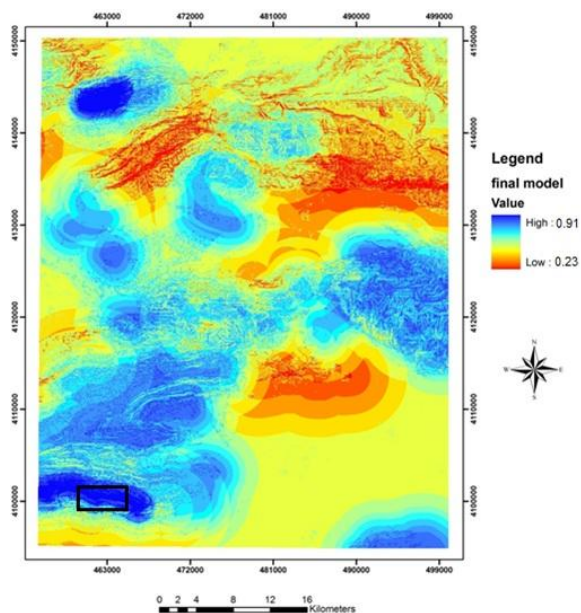
مقدار استاندارد گاما مورد استفاده در مطالعات اکتشافی ۰/۹۵ است که در این مطالعه نیز از همین مقدار استفاده شد [۲].

برای وارد کردن داده‌های ذکر شده با استفاده از فرآیند تلفیق، لازم است نخست هر کدام از داده‌ها دسته‌بندی شده و به هر دسته امتیازی بین صفر تا یک تعلق گیرد. برای تقسیم‌بندی داده‌ها از روش خطی استفاده شد و سپس بالاترین امتیازات به مطلوب‌ترین گروه اختصاص یافت. این روش که بر پایه اطلاعات

جدول ۲: میزان بافر و امتیاز فازی در نظر گرفته شده برای پارامتر شیب

۴۵-۷۴	۳۵-۴۵	۲۵-۳۵	۲۰-۲۵	۱۵-۲۰	۱۰-۱۵	۰-۱۰	دسته (درجه)
۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۶	۰/۷	۰/۵	امتیاز

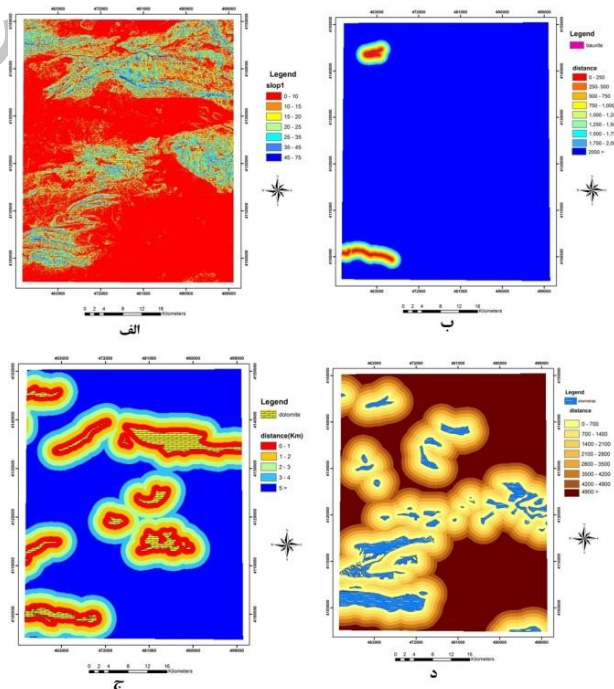
در شکل ۸ نقشه‌های حریم بوکسیت، دولومیت، شیب و ماسه-سنگ‌های سازند شمشک منطقه نشان داده شده است. در نهایت این چهار لایه با استفاده از نرم‌افزار Arc Map پس از تبدیل به نقشه‌های رستری و طبقه‌بندی مجدد و تخصیص وزن‌های مربوطه با استفاده از عملگر فازی گاما (گامای ۹۵ درصد) تلفیق شدند. نقشه حاصل از تلفیق داده‌های اکتشافی منطقه مورد مطالعه به روش فازی در شکل ۹ آمده است. در این نقشه مناطقی که ارزش پتانسیل بیشتری برای حضور کانی‌سازی دارند با امتیاز فازی بالاتر مشخص شده‌اند. بنابراین مناطقی که در شکل ۹ به رنگ آبی نشان داده شده است مناسب برای اکتشافات تفصیلی ماده معدنی بوکسیت تشخیص داده شد. موقعیت معادن بوکسیت جاجرم نیز در کادر سیاه رنگ گوشه پایین سمت چپ تصویر نشان داده شده است.



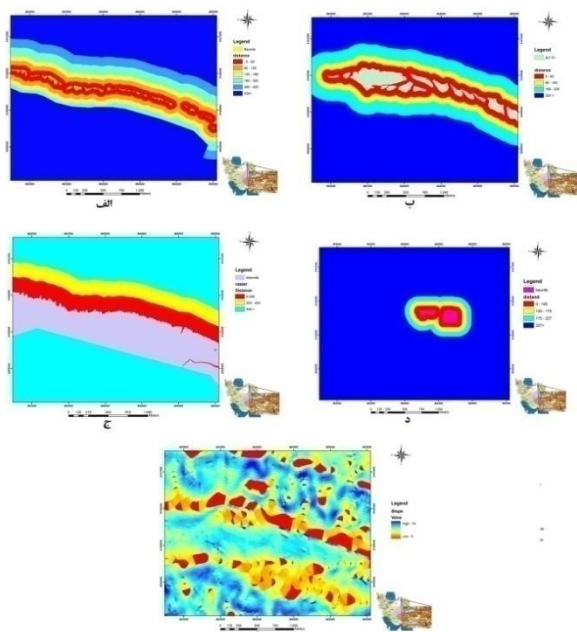
شکل ۹: نقشه نهایی پتانسیل معدنی بوکسیت در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سنخواست

### ۳-۲- تلفیق داده‌های اکتشافی در مقیاس بزرگ برای تعیین محدوده‌های بهینه حفاری اکتشافی

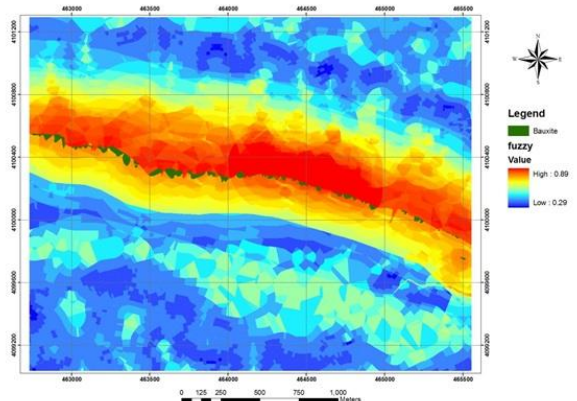
نقشه‌های مقاومت ویژه در هشت عمقی که پیشتر بیان شد تهیه شدند اما در پایان یک نقشه نهایی برای مقاومت ویژه به منظور تلفیق داده‌های اکتشافی ارائه شد. به عبارتی هدف در این مرحله ارائه یک روش مناسب به تصویر کشیدن اطلاعات سه‌بعدی به یک نقشه دوبعدی است که در برگیرنده اطلاعات مربوط به تمام عمق‌ها باشد. بدین منظور با به کارگیری عملگر گاما نقشه‌های فازی مقاومت ویژه مربوط به هشت عمق تلفیق شدند. نتیجه آن شد که بی‌هنجاری‌هایی که گسترش عمقی بیشتری دارند در چند عمق ظاهر شدند و همدیگر را تقویت کردند و در نقشه نهایی ارزش فازی بیشتری نسبت به بی‌هنجاری‌هایی که گسترش عمقی کمتری دارند به خود اختصاص داده‌اند. پس از تهیه نقشه خروجی مقادیری با ارزش فازی بالاتر از ۰/۶ با استفاده از محاسبات رستری جدا



شکل ۸: الف) نقشه شیب منطقه بر حسب درجه، ب) نقشه حریم بوکسیت‌های منطقه بر حسب متر، ج) نقشه حریم دولومیت‌های منطقه بر حسب کیلومتر، د) نقشه حریم واحد‌های سیلیسی منطقه بر حسب متر



شکل ۱۰: الف) نقشه حریم بوکسیت‌های منطقه بر حسب متر، ب) نقشه حریم واحدهای سیلیسی بر حسب متر، ج) نقشه حریم دولومیت‌های منطقه بر حسب متر، د) نقشه حریم ژئوفیزیک، ه) نقشه شیب منطقه بر حسب درجه



شکل ۱۱: نقشه نهایی تعیین محدوده‌های بهینه حفاری اکتشافی منطقه با استفاده از روش منطق فازی

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی حداقل وجود چهار لایه ژئوالکتریکی را در منطقه تاگویی واقع در محدوده معدنی بوکسیت جاجرم، نشان می‌دهند. با استفاده از سنجش از دور و روش نسبت‌گیری بانندی می‌توان شواهد غیرمستقیم وجود بوکسیت در منطقه مانند شناسایی دولومیت‌ها و ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک را مشخص کرد. اما چون قدرت تفکیک

شد و به‌عنوان لایه‌ای که از نظر ژئوفیزیکی بوکسیت است؛ جدا شد. حال مناطق جدا شده آماده برای تهیه نقشه حریم است که برای این نقشه ۳ بافر ۷۰ متری در نظر گرفته شد.

برای واحدهای سنگی سازند شمشک، فقط محدوده سنی ژوراسیک پایین که قسمت زیرین سازند شمشک است و قسمت بالایی لایه بوکسیتی است؛ در نظر گرفته شد و برای آن ۵ بافر ۸۰ متری پیش‌بینی شد. برای واحد سنگی دولومیتی ۳ بافر ۲۰۰ متری در نظر گرفته شد که قسمت جنوبی آن با توجه به این که احتمال تشکیل بوکسیت در زیر دولومیت وجود ندارد؛ حذف شد. برای واحد سنگی بوکسیتی ۸ بافر ۶۰ متری که در این جا هم مانند دولومیت با توجه به این که جهت شیب لایه بوکسیتی به سمت شمال است؛ قسمت‌هایی از بافرهای جنوبی آن حذف شد. برای تهیه نقشه شیب از نقشه توپوگرافی ۱:۱۰۰۰ منطقه استفاده شد. این نقشه در هفت دسته طبقه‌بندی شد. سپس بر اساس اهمیت هر کدام از لایه‌ها، به هر کلاس امتیازی داده شد. به این صورت که در قسمت اصلی واحد سنگی بوکسیتی (خود لایه) امتیاز ۱ و در بافرها به ترتیب دور شدن امتیازهای ۰/۹ و ۰/۸ و ۰/۷ و غیره تا ۰/۱ داده شد. به لایه ژوراسیک پایین سازند شمشک هم امتیازی بین ۰/۷ تا ۰/۱ داده شد. برای دو لایه دیگر نیز امتیاز دادن مانند قسمت قبل متفاوت بود. به این صورت که برای لایه دولومیتی روی خود واحد دولومیتی امتیاز ۰/۱ و بقیه امتیازها به ترتیب دور شدن از بافر امتیازهای ۰/۵ تا ۰/۲ داده شد. همین طور لایه شیب که نحوه امتیازدهی آن مانند جدول ۱ است. برای لایه ژئوفیزیکی نیز امتیازی بین ۰/۵ تا ۰/۱ در نظر گرفته شد (شکل ۱۰). در نهایت این پنج لایه با استفاده از نرم‌افزار Arc Map پس از تبدیل به نقشه‌های رستری و طبقه‌بندی مجدد و تخصیص وزن‌های مربوطه با استفاده از عملگر فازی گاما با مقدار ۹۵ درصد تلفیق شدند. نقشه حاصل از تلفیق داده‌های اکتشافی منطقه مورد مطالعه به روش فازی در شکل ۱۱ آمده است. در این نقشه، مناطقی که دارای ارزش پتانسیل بیشتری برای حضور کانی‌سازی باشند، با امتیاز فازی بالاتر مشخص شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، مناطقی که با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند، ارزش فازی بالاتری دارند و احتمال حضور کانی‌سازی بوکسیت در آنها بالاتر است. این مناطق بیشتر در قسمت مرکزی و با یک روند شرقی-غربی نمایش داده شده‌اند.



- [7]. "Geological map of SANKHAST" Geological survey of IRAN.
- [8]. Gozzard, John Robert. Image processing of ASTER multispectral data. Geological Survey of WA, (2006).
- [9]. Kalinowski, Aleks, and Simon Oliver. "ASTER mineral index processing manual." Remote Sensing Applications, Geoscience Australia 37 (2004).
- [10]. Gupta, Ravi P. Remote sensing geology. Springer Science & Business Media, 2003.
- [11]. Agar, Bob. "ASTER Alteration Mineral Mapping." Las Pampas, Cajamarca, Peru for B&G Mining SAC (2001).
- [12]. Watanabe, Hiroshi, and Kazuaki Matsuo. "Rock type classification by multi-band TIR of ASTER." Geosciences Journal 7.4 (2003): 347-358.
- [13]. Zadeh, Lotfi A. "Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic." Fuzzy sets and systems 90.2 (1997): 111-127.
- [14]. Carranza, Emmanuel John Muico. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. Vol. 11. Elsevier, 2008.
- [15]. Nykänen, V., et al. "Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper-gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland." Australian Journal of Earth Sciences 55.1 (2008): 25-38.
- [16]. Carranza, Emmanuel John M., and Martin Hale. "Geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines." Natural Resources Research 10.2 (2001): 125-136.
- [17]. Uckun, Mustafa, Mehmet Ali Ozturk, and Young Bae Jun. "Intuitionistic fuzzy sets in gamma- semigroups." BULLETIN-KOREAN MATHEMATICAL SOCIETY 44.2 (2007): 359.
- مکانی تصاویر مورد استفاده در این تحقیق پایین است نمی‌توان خود لایه بوکسیتی را به‌درستی شناسایی کرد.
- این تحقیق، کاربرد منطق فازی را برای تلفیق داده‌های سنجش از دور، ژئوفیزیک و زمین‌شناسی در منطقه جاجرم نشان می‌دهد. مدل پتانسیل کانی‌زایی به‌دست آمده شامل مناطقی با مطلوبیت بالا است که می‌تواند شامل نهشته‌های جدید باشد. همان‌طور که در این تحقیق مشاهده می‌شود مناطق با مطلوبیت بالا نخست در مقیاس ناحیه‌ای مشخص شدند و سپس مطالعات در مناطقی که در مرحله نخست شامل مطلوبیت بالایی بود، انجام شد و در نهایت در این مرحله محدوده‌های مناسب برای حفاری اکتشافی مشخص و پیشنهاد شد.
- مراجع**
- [1]. Harris, J. R., et al. "Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps—a case study: mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada." Natural Resources Research 10.2 (2001): 91-124.
- [2]. Bonham-Carter, Graeme. Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. No. 13. Elsevier, 1994.
- [3]. Ranjbar, H., and M. Honarmand. "Integration and analysis of airborne geophysical and ETM+ data for exploration of porphyry type deposits in the Central Iranian Volcanic Belt using fuzzy classification." International Journal of Remote Sensing 25.21 (2004): 4729-4741.
- [4]. Fathian poor, N. Ghaed rahmati, R. Hazeri, M. "Determining high potential's zones of lead and zinc mineralization ISFAHAN-IRANKOH with GIS." Iranian Journal of Mining Engineering fourth P, No. 8, 1388, 13-22.
- [5]. Knox-Robinson, C. M. "Vectorial fuzzy logic: a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic gold mineralisation potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia." Australian Journal of Earth Sciences 47.5 (2000): 929-941.
- [6]. IRALCO, "Economic and technical studies of JAJARM Bauxite mine." ministry of industries and mines. 1379